



Analisa *burr* pada proses *end-Milling* baja karbon lunak profil siku menggunakan CNC Router s

Mazwan ^{a,*}, Bambang Dwi Haripriadi ^b

^a Program Studi Teknik Mesin, Politeknik Jambi, Jln Lingkar Barat 2 Kota Jambi, 36361, Indonesia

^b Program Studi Sarjana Terapan Teknik Mesin Produksi dan Perawatan Politeknik Negeri Bengkalis, Bengkalis, 28711, Indonesia

INFO ARTIKEL

Riwayat Artikel:

Diterima 13 Januari 2024

Diterima setelah direvisi 18 April 2024

Disetujui 30 April 2024

Kata kunci:

Proses Pemesinan

End-Milling

Burr

Abstract-This research aims to investigate and analyze burr formation in the end-milling process of soft carbon steel using a CNC Router on an angle profile. Burrs are residual material that protrudes along the edges of processing results and can affect the quality of the final product and operational safety. This research methodology includes end-milling experiments on soft carbon steel with variations in cutting parameters such as spindle speed, depth of cut, and type of cutting fluid. The experimental design used the Taguchi orthogonal array L_9 matrix method and data analysis used AONOVA. The results of data analysis show that spindle speed is the main parameter that influences burr formation, followed by depth of cut and type of cutting fluid. The burr value increases with increasing spindle speed and depth of cut. The dry machining process has been proven to increase burr growth.

Intisari-Penelitian ini bertujuan untuk menginvestigasi dan menganalisis terbentuknya *burr* pada proses *end-milling* baja karbon lunak dengan menggunakan CNC Router pada profil siku. *Burr* merupakan sisa material yang menonjol di sepanjang tepi hasil pemrosesan dan dapat memengaruhi kualitas produk akhir serta keamanan operasional. Metodologi penelitian ini mencakup eksperimen *end-milling* pada baja karbon lunak dengan variasi parameter pemotongan seperti kecepatan spindle, kedalaman pemotongan, dan jenis cairan pemotongan. Desain eksperimen menggunakan metode Taguchi *matriks ortogonal array* L_9 dan analisa data menggunakan AONOVA. Hasil analisa data menunjukkan kecepatan spindle merupakan parameter utama yang mempengaruhi pembentukan *burr*, diikuti dengan kedalaman potong dan jenis cairan pemotongan. Nilai *burr* meningkat dengan meningkatnya kecepatan spindle dan kedalaman potong. Proses pemesinan kering (*dry*) terbukti dapat meningkatkan pertumbuhan *burr*.

1. Pendahuluan

Dalam era dinamika industri manufaktur yang terus berkembang, inovasi dan peningkatan proses produksi menjadi kunci untuk mempertahankan daya saing [1]. Proses *end-milling* pada material baja karbon lunak, khususnya pada pembuatan profil siku, merupakan elemen vital dalam rantai produksi komponen struktural. Meskipun teknologi CNC Router telah menghadirkan kemajuan luar biasa dalam efisiensi dan akurasi pemesinan, pembentukan *burr* tetap menjadi permasalahan yang signifikan [2].

Meningkatkan kualitas akhir dari proses pemesinan memiliki dampak yang signifikan terhadap daya saing produk, efisiensi produksi, dan biaya keseluruhan [3]. Kualitas yang lebih tinggi tidak hanya menciptakan produk yang lebih menarik bagi konsumen, tetapi juga mengurangi biaya finishing dan perbaikan, meningkatkan kepuasan pelanggan, dan mengurangi risiko keamanan [4]. Selain itu, dengan memastikan ketepatan dimensi dan toleransi, perusahaan dapat memenuhi standar industri dan mendukung reputasi positif, menciptakan siklus produksi yang efisien, ekonomis, dan sesuai dengan harapan pasar [4, 5].

Burr adalah geram yang menempel pada tepi material yang muncul akibat proses pemesinan atau pembentukan, terbentuk ketika alat pemotong

* Corresponding Author:

E-mail: mazwan@politeknikjambi.ac.id (Mazwan)

berinteraksi dengan material. Faktor-faktor seperti kecepatan pemotongan, kecepatan putaran spindle, gerak makan, dan jenis material memengaruhi pembentukan *burr* [7]. *Burr* dapat memiliki berbagai bentuk dan ukuran, dari yang mikro hingga makro. Pembentukan *burr* dapat merugikan kualitas produk, meningkatkan gesekan, dan menghambat perakitan. Pencegahan melibatkan pengaturan parameter pemesinan yang optimal, pemilihan alat yang tepat, dan penggunaan teknologi canggih [8].

Penelitian yang dilakukan oleh Hajiahmadi (2019) pada proses *milling stainless steel 316L* menunjukkan ketinggian *burr* meningkat dengan meningkatnya kecepatan putaran sepindel dan kedalaman potong [9]. Penelitian lain yang dilakukan oleh Shanmugam dkk. (2023) menyatakan parameter yang paling mempengaruhi pertumbuhan *burr* adalah kecepatan potong dan gerak makan arah aksial [10]. Selain itu, Lee dan Dornfeld (2004) dalam penelitiannya menyatakan bahwa nilai *burr* lebih besar terjadi pada proses *milling konvensional* [11]. Selain parameter proses, cairan pemotongan atau *cutting fluid* juga memberi pengaruh penting dalam meningkatkan kualitas permukaan yang dihasilkan [12]. Penggunaan cairan pemotongan dapat menurunkan temperature pada proses pemotongan sehingga bisa mengurangi terjadinya deformasi plastis pada material.

Baja karbon lunak, yang terkenal karena kombinasi kekuatan dan keuletannya, sering menjadi bahan pilihan dalam pembuatan komponen struktural. Namun, kendala *burr* yang terbentuk selama proses *end-milling* dapat merugikan kualitas produk, meningkatkan biaya produksi, dan menghambat tingkat presisi yang diinginkan [13]. Oleh karena itu, penyelidikan yang cermat terkait faktor-faktor yang mempengaruhi pembentukan *burr* dalam konteks pemesinan profil siku menjadi esensial.

Dalam menghadapi kompleksitas ini, perlu pemahaman secara mendalam terkait fenomena *burr* dan mengidentifikasi parameter kritis yang berkontribusi pada pembentukannya. Meskipun literatur ilmiah telah menggambarkan sejumlah studi tentang optimasi parameter pemesinan untuk mengurangi *burr* pada baja karbon, penelitian khusus terkait profil siku dengan menggunakan CNC Router masih relatif terbatas.

Perkembangan industri manufaktur yang pesat dan penetrasi teknologi CNC Router memberikan landasan kuat untuk penelitian ini. CNC Router telah menjadi tulang punggung produksi presisi, membuka peluang baru namun juga menimbulkan kompleksitas tersendiri. Konteks industri manufaktur telah mengalami evolusi dramatis, terutama dengan integrasi teknologi CNC Router yang mengizinkan kontrol presisi yang tinggi. Namun, tantangan dalam penanganan *burr* tetap ada, dan pemahaman terperinci tentang interaksi antara parameter pemesinan, karakteristik material, dan desain profil menjadi penting untuk meningkatkan kontrol proses.

Dengan merangkai konteks industri yang dinamis, permasalahan yang terdefinisi jelas, dan penelitian terdahulu yang memberikan dasar, penelitian ini diharapkan tidak hanya akan memberikan wawasan mendalam terkait analisis *burr* pada proses *end-milling* baja karbon lunak profil siku dengan CNC Router tetapi juga mengisi celah pengetahuan dalam mengoptimalkan proses pemesinan di era manufaktur modern.

2. Metodologi

2.1 Peralatan dan Bahan

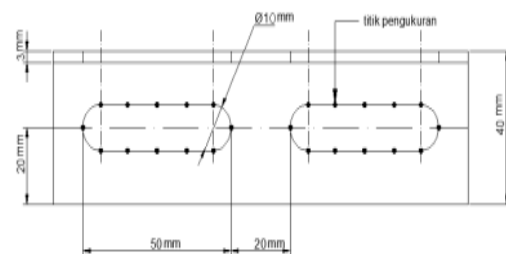
Proses *milling* di lakukan dengan menggunakan mesin CNC Router. Pengukuran *burr* dilakukan menggunakan USB *Digital Microscope* (BSPIL-MET-DTI-DE400) dengan *magnification ratio* 600 – 1600X. Benda kerja yang digunakan dalam melaksanakan penelitian ini adalah baja karbon lunak dengan dimensi 40 x 40 x 3 mm. Jenis pahat *end mill* yang digunakan dalam penelitian adalah jenis *high speed steel* (HSS) dengan merek *Super Hard Endmill* diameter yaitu 10 mm. Cairan pemotongan menggunakan 3 jenis cairan yaitu *straight oils*, *soluble oil* dan udara. Gambar 1 menunjukkan skema dari percobaan.



Gambar 1. Skematik Penelitian

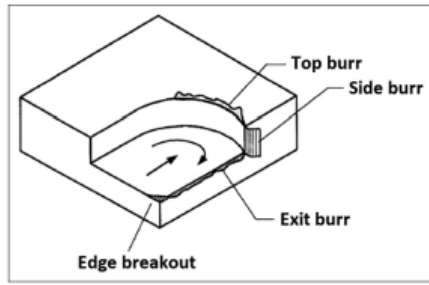
2.2 Metode Pengukuran

Pengukuran dilakukan menggunakan USB *digital microscope* yang dihubungkan langsung ke laptop. Terdapat 6 titik pengukuran untuk 1 spesimen. Panjang alur untuk satu specimen adalah 50 mm. Titik pengukuran yang dilakukan ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Titik Pengukuran *Burr*

Proses pengukuran *burr* yang dilakukan mengikuti referensi dari penelitian terdahulu yang relevan [13, 14, 15]. Gambar 3 menunjukkan *burr* yang terjadi pada proses *end milling*.



Gambar 3. *Burr* Pada Proses *End Milling* [16]

2.3 Rancangan Eksperimen

Sebelum ditentukan rancangan eksperimen yang akan digunakan terlebih dahulu dilakukan penentuan parameter-parameter proses yang akan digunakan. Parameter proses yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter Proses

Parameter Proses	Unit	Level			
		1	2	3	
A	Kedalaman potong	mm	2	4	6
B	Kecepatan Spindel	Rpm	1000	1500	2000
C	Jenis Cairan Pemoangan	-	<i>Straight Oils</i>	<i>soluble oil</i>	<i>Dry</i>

Berdasarkan Tabel 1 rancangan eksperimen yang digunakan adalah metode Taguchi yaitu menggunakan matriks ortogonal L_9 dengan total 9 percobaan yang dilakukan secara acak dengan replikasi tiga kali. Rancangan eksperimen matriks ortogonal L_9 ditunjukkan pada Tabel 2.

3. Hasil dan Pembahasan

Data hasil pengukuran ditunjukkan pada Tabel 2. Pengolahan dan Analisa data menggunakan aplikasi Minitab19. Respon yang diukur adalah *burr*. Nilai rata-rata respon hasil pengukuran selanjutnya dilakukan perhitungan *S/N Ratio*. Rasio *S/N* (*Signal to Noise*) digunakan sebagai kriteria dalam memilih faktor-faktor yang berkontribusi pada pengurangan variasi suatu respon. Konsep Rasio *S/N* didesain untuk mengubah data pengukuran menjadi nilai yang mencerminkan tingkat variasi, tergantung pada sifat karakteristik kualitas yang diukur. Dalam penelitian ini, karakteristik respon yang diinginkan adalah semakin kecil semakin (*smaller is better*). Perhitungan Rasio *S/N* dilakukan menggunakan Minitab 19 dengan menerapkan persamaan 1. Hasil perhitungan Rasio *S/N* ditunjukkan pada Tabel 2.

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^r Y_i^2 \right] \quad (1)$$

Tabel 2. Rancangan Eksperimen dan Hasil Pengukuran

No	A	B	C	<i>Burr</i> (mm)			Rata-rata	Rasio S/N
				R1	R2	R3		
1	1	1	1	0,155	0,280	0,165	0,200	13,643
2	1	2	2	0,429	0,463	0,370	0,420	7,482
3	1	3	3	0,667	0,851	0,627	0,714	2,835
4	2	1	1	0,133	0,316	0,150	0,199	13,305
5	2	2	3	0,754	0,652	0,672	0,692	3,173
6	2	3	2	0,947	0,915	0,750	0,870	1,160
7	3	1	3	0,821	0,533	1,167	0,840	1,117
8	3	2	2	0,732	0,750	0,828	0,769	2,261
9	3	3	1	1,120	1,062	0,300	0,827	0,841

3.1. Penentuan Parameter Optimum

Penentuan parameter optimum dilakukan menggunakan metode Taguchi. Hasil parameter optimum ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. *Response Table for Means*

Level	A	B	C
1	0,4452	0,4134	0,4090
2	0,5877	0,6277	0,6870
3	0,8124	0,8043	0,7493
Delta	0,3672	0,3909	0,3403
Rank	2	1	3

Berdasarkan Tabel 3, parameter optimum yang didapatkan adalah kecepatan spindel level 1 yaitu dengan nilai rata-rata sebesar 0,4452, kedalaman potong level 1 dengan nilai rata-rata sebesar 0,4134, dan jenis cairan pemoangan level 1 dengan nilai rata-rata sebesar 0,4090. Pemilihan parameter optimum berdasarkan karakteristik kualitas semakin kecil semakin baik (*smaller is better*).

3.2. Analisa Data

Data hasil pengukuran selanjutnya dilakukan *Analysis of Variance* (ANOVA) untuk melihat parameter proses yang memberi pengaruh secara signifikan terhadap respon. Selain itu, tujuan ANOVA adalah untuk melihat besarnya kontribusi setiap parameter proses terhadap respon. Hasil ANOVA ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. *Analysis of Variance*

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
A	2	0,616	25,01%	0,616	0,308	7,34	0,004
B	2	0,689	27,96%	0,689	0,344	8,21	0,002
C	2	0,320	12,97%	0,320	0,160	3,81	0,040
Error	20	0,840	34,05%	0,840	0,042		
Lack-of-Fit	2	0,123	5,02%	0,123	0,061	1,55	0,238
Pure Error	18	0,716	29,04%	0,716	0,039		
Total	26	2,466	100%				

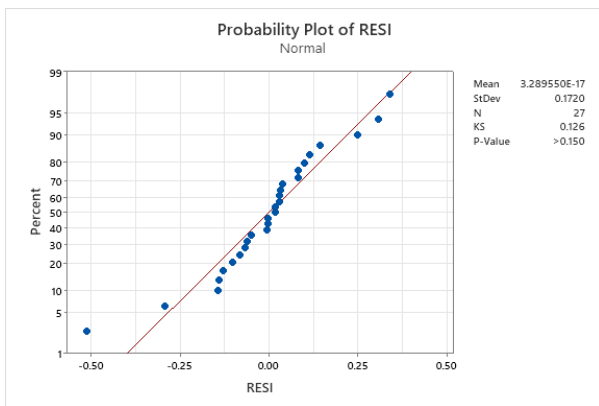
Dari hasil ANOVA pada Tabel 4 dapat dilihat untuk setiap parameter nilai *P-value* < α dimana $\alpha = 0,05$. Hal ini bermaksud semua parameter-parameter proses yang digunakan berpengaruh secara signifikan terhadap respon. Parameter kecepatan spindel memiliki kontribusi yang paling besar terhadap pembentukan *burr* dengan nilai 27,96%. Perbedaan kedalaman potong memiliki kontribusi sebesar 25,01%. Jenis cairan pemoangan memiliki kontribusi paling kecil terhadap pembentukan *burr* pada penelitian ini dengan nilai 12,97%. Akan tetapi, jenis cairan pemoangan tetap berpengaruh secara signifikan terhadap pembentukan *burr* pada penelitian ini. Parameter kecepatan spindel dan kedalaman potong merupakan faktor

utama yang mempengaruhi pertumbuhan *burr* pada penelitian ini. Hal ini dapat dilihat dari besarnya nilai kontribusi dari kedua parameter ini pada Tabel 4. Hasil serupa juga dinyatakan oleh Shanmugam dkk. (2023) kecepatan spindle merupakan faktor utama pada pembentukan *burr* pada proses *milling* [10]. Penelitian lain yang dilakukan oleh Gaitonde dkk. (2007) menyatakan kedalaman potong dan kecepatan spindle merupakan parameter yang mempengaruhi pertumbuhan *burr* [17].

Berdasarkan Tabel 4, dimungkinkan untuk menerapkan dan menemukan persamaan yang menghubungkan *burr* dengan kedalaman potong, kecepatan spindle dan jenis cairan pemotongan. Persamaan yang didapat ditunjukkan pada persamaan 2 dengan nilai R-sq 66,99%.

$$Burr = -0.587 + 0.0605 A + 0.000344 B + 0.1415 C \quad (2)$$

Selanjutnya untuk memenuhi asumsi dari penggunaan ANOVA, dilakukan pengujian normalitas dari residual. Hasil uji normalitas ditunjukkan pada Gambar 4.

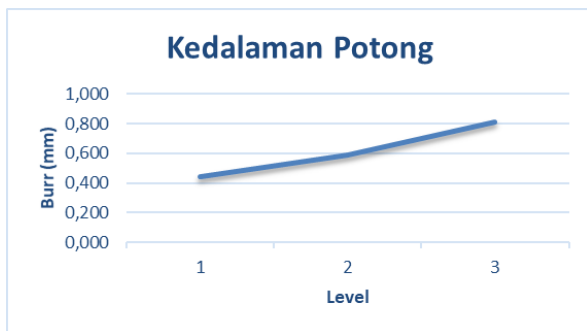


Gambar 4. Probability plot of Residual

Dari hasil uji normalitas diatas dapat dilihat nilai p value > α dan nilai mean 3,289220e⁻¹⁷ yang bermakna mendekati nol maka residual diatas terdistribusi normal dan memenuhi asumsi dari uji ANOVA.

3.3. Pengaruh Parameter-Parameter Proses

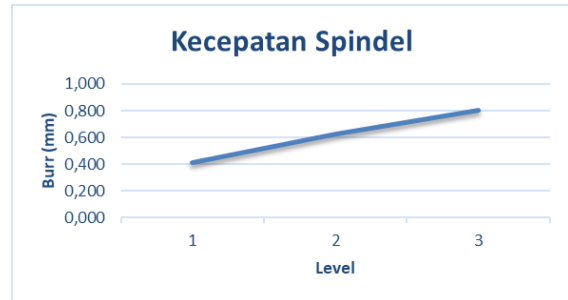
Pengaruh kedalaman potong terhadap *burr* ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Pengaruh Kedalaman Potong Terhadap Pembentukan Burr

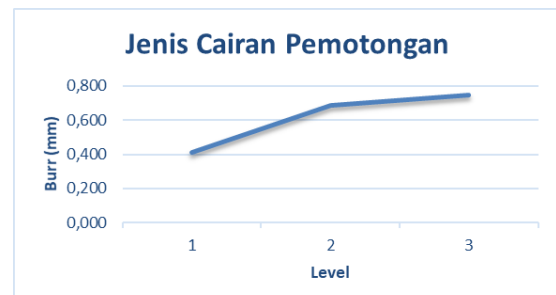
Berdasarkan Gambar 5, nilai *burr* tertinggi dicapai dengan kedalaman potong 6 mm, sedangkan nilai *burr* terendah dicapai dengan kedalaman potong 2 mm. Hasil ini menunjukkan peningkatan kedalaman potong akan meningkatkan pembentukan *burr*. Hasil serupa juga dinyatakan Adeniji dkk (2020) pada penelitiannya [18]. Hal ini disebabkan dengan meningkatnya kedalaman potong yang lebih besar dapat menghasilkan tekanan dan gaya

potong yang lebih tinggi, menyebabkan deformasi plastis yang signifikan pada benda kerja. Pemindahan material yang lebih besar selama pemotongan dapat menciptakan kondisi di mana material yang terdeformasi secara plastis memiliki lebih banyak peluang untuk membentuk *burr* [19]. Tegangan yang lebih tinggi pada material di sekitar zona pemotongan juga dapat memperparah deformasi plastis dan mendorong terbentuknya *burr* pada tepi benda kerja. Selain itu, peningkatan panas yang dihasilkan selama pemotongan pada kedalaman yang lebih besar dapat meningkatkan kemungkinan pembentukan *burr*.



Gambar 6. Pengaruh Kecepatan Spindel Terhadap Pembentuk Burr

Pengaruh kecepatan spindle ditunjukkan pada Gambar 6. Berdasarkan Gambar 6, nilai *burr* meningkat dengan meningkatnya kecepatan spindle. Hal ini disebabkan Ketika kecepatan spindle meningkat, kecepatan potong juga meningkat dan menyebabkan pergerakan benda kerja melintasi permukaan pahat dengan kecepatan lebih tinggi. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan kecepatan pemotongan merupakan faktor paling signifikan yang mempengaruhi keausan pahat [20]. Oleh karena itu, keausan pahat yang lebih besar dapat menyebabkan pembajakan pada proses pemotongan, hal ini akan menghasilkan pembentukan *burr* yang lebih besar [21]. Seperti yang dijelaskan pada paragraf sebelumnya, setiap proses pemesinan yang menghasilkan deformasi plastis dapat meningkatkan kemungkinan pembentukan *burr*. Dengan demikian, seiring dengan peningkatan kecepatan spindle, temperatur pemotongan pada pahat dan benda kerja pada daerah pemotongan juga meningkat [9]. Oleh karena itu, deformasi plastis dan keuletan material yang meningkat akan mengakibatkan peningkatan ukuran *burr*.



Gambar 7. Pengaruh Jenis Cairan Pemotongan Terhadap Pembentukan Burr

Panas yang dihasilkan selama proses pemesinan berdampak pada umur pahat yang lebih pendek. Seperti yang dijelaskan sebelumnya, pahat yang sudah mengalami keausan akan menyebabkan peningkatan *burr*. Berbagai metode telah dilaporkan untuk melindungi pahat dari panas yang dihasilkan selama proses pemesinan. Alternatif yang diusulkan adalah dengan

menerapkan cairan pemotongan dalam operasi pemesinan [22]. Cairan pemotongan digunakan untuk memberikan efek pelumasan dan pendinginan antara pahat dan benda kerja selama proses pemesinan. Pengaruh jenis cairan pemotongan terhadap pembentukan *burr* pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 7.

Berdasarkan Gambar 7, nilai *burr* minimum didapatkan dengan menggunakan jenis cairan pemotongan *straight oils*. Hal ini disebabkan karena *straight oils* memberikan efek perlindungan seperti bantalan antar pahat dan benda kerja [22]. Hasil ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Claudin dkk. (2010) [23]. Proses pemesinan kering (*Dry*) menghasilkan nilai *burr* yang tinggi dibandingkan dengan proses pemesinan menggunakan cairan pemotongan. Hal ini dikarenakan proses pemesinan kering menghasilkan temperatur yang tinggi antara pahat dan benda kerja, sehingga menyebabkan deformasi dan pembentukan *burr*. Penelitian yang dilakukan oleh Sharma dkk. (2013) juga menunjukkan temperature pada proses pemesinan menurun dengan menggunakan cairan pemotongan [24].

4. Simpulan

Berdasarkan eksperimen dan Analisa yang telah dilakukan, maka dapat ditarik kesimpulan bahwa Kecepatan spindel memiliki kontribusi yang paling besar terhadap pembentukan *burr* dengan nilai 27,96%. Kedalaman potong memiliki kontribusi sebesar 25,01%. Jenis cairan pemotongan memiliki kontribusi paling kecil terhadap pembentukan *burr* pada penelitian ini dengan nilai 12,97%. Kombinasi parameter optimum yang didapatkan adalah kecepatan spindel level 1 yaitu dengan nilai rata-rata sebesar 0,4452, kedalaman potong level 1 dengan nilai rata-rata sebesar 0,4134, dan jenis cairan pemotongan level 1 dengan nilai rata-rata sebesar 0,4090. Peningkatan kecepatan spindel dan kedalaman potong terbukti meningkatkan pembentukan *burr*. Selain itu proses pemesinan tanpa menggunakan cairan pemotongan juga terbukti meningkatkan pembentukan *burr*.

Referensi

- [1] Mazwan, S. Darma Utama, dan R. Anita Fajardini, "Investigasi Gaya Potong, Kekasaran Permukaan dan Keausan Pahat Pada Proses Bubut Baja Menggunakan Teknik Pelumasan Minimum Quantity Lubrication (MQL) Berbasis Minyak Nabati," vol. 26, no. 2, hal. 15–22, 2024.
- [2] D. Dornfeld dan S. Min, "Burrs - Analysis, Control and Removal," *Burrs - Anal. Control Remov.*, 2010, doi: 10.1007/978-3-642-00568-8.
- [3] Mazwan, M. K. Effendi, B. O. P. Soepangkat, S. D. Utama, dan R. A. Fajardini, "Multi-objective Optimization of Turning Process Steel SKD 11 Using BPNN-Artificial Bee Colony (ABC) Method," in *Proceedings of the 6th Mechanical Engineering, Science and Technology International conference*, Atlantis Press International BV, 2022, hal. 520–529. doi: 10.2991/978-94-6463-134-0.
- [4] S. D. Utama, A. Wahjudi, M. K. Effendi, B. O. P. Soepangkat, dan R. A. Fajardini, "Multi-objective Optimization Using BPNN-PSO in the Face Milling Process of AISI 1045," in *Proceedings of the 6th Mechanical Engineering, Science and Technology International conference*, Atlantis Press International BV, 2022, hal. 541–549. doi: 10.2991/978-94-6463-134-0.
- [5] F. R. Anita, M. K. Effendi, B. O. P. Soepangkat, dan S. D. Utama, "Multi-objective Optimization of AISI 1045 on Drilling Process Based on Hybrid BPNN and Firefly Algorithm," in *Proceedings of the 6th Mechanical Engineering, Science and Technology International conference*, Atlantis Press International BV, 2022, hal. 530–540. doi: 10.2991/978-94-6463-134-0.
- [6] M. Sarwar dan J. Haider, "Aspects of burr formation in bandsaw teeth manufactured by milling operation," *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 26, no. 6, hal. 596–601, 2010, doi: 10.1016/j.rcim.2010.06.025.
- [7] L. Chen, D. Deng, G. Pi, X. Huang, dan W. Zhou, "Burr formation and surface roughness characteristics in micro-milling of microchannels," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 111, no. 5–6, hal. 1277–1290, 2020, doi: 10.1007/s00170-020-06170-4.
- [8] E. Bahçe dan B. Özdemir, "Burr Measurement Method Based on Burr Surface Area," *Int. J. Precis. Eng. Manuf. - Green Technol.*, vol. 8, no. 4, hal. 1287–1296, 2021, doi: 10.1007/s40684-020-00228-0.
- [9] S. Hajiahmadi, "Burr size investigation in micro milling of stainless steel 316L," *Int. J. Light. Mater. Manuf.*, vol. 2, no. 4, hal. 296–304, 2019, doi: 10.1016/j.ijlmm.2019.07.004.
- [10] R. Shanmugam, S. S. Baloor, U. Koklu, A. Polishetty, dan G. Bolar, "Machining Temperature, Surface Integrity and Burr Size Investigation during Coolant-Free Hole Milling in Ti6Al4V Titanium Alloy," *Lubricants*, vol. 11, no. 8, 2023, doi: 10.3390/lubricants11080349.
- [11] K. Lee dan D. A. Dornfeld, "Micro-burr formation and minimization through process control," *Precis. Eng.*, vol. 29, no. 2, hal. 246–252, 2005, doi: 10.1016/j.precisioneng.2004.09.002.
- [12] Mazwan dan M. K. Effendi, "OPTIMASI MULTI RESPON PADA PROSES BUBUT BAJA AISI 4140 DENGAN METODE BACKPROPAGATION NEURAL NETWORK, PARTICLE SWARM OPTIMIZATION, DAN ARTIFICIAL BEE COLONY MENGGUNAKAN TEKNIK MINIMUM QUANTITY LUBRICATION," Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2023. [Daring]. Tersedia pada: <https://repository.its.ac.id/102890/>
- [13] S. A. Niknam dan V. Songmene, "Milling burr formation, modeling and control: A review," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, vol. 229, no. 6, hal. 893–909, 2015, doi: 10.1177/0954405414534827.
- [14] G. L. Chern, "Experimental observation and analysis of burr formation mechanisms in face milling of aluminum alloys," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 46, no. 12–13, hal. 1517–1525, 2006, doi: 10.1016/j.ijmactools.2005.09.006.
- [15] S. S. F. Chang dan G. M. Bone, "Burr size reduction in drilling by ultrasonic assistance," *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 21, no. 4–5, hal. 442–450, 2005, doi: 10.1016/j.rcim.2004.11.005.
- [16] S. A. Niknam dan V. Songmene, "Analytical modelling of slot milling exit burr size," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 73, no. 1–4, hal. 421–432, 2014, doi: 10.1007/s00170-014-5758-y.
- [17] V. N. Gaitonde, S. R. Karnik, B. T. Achyutha, dan B. Siddeswarappa, "Genetic algorithm-based burr size minimization in

- drilling of AISI 316L stainless steel,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 197, no. 1–3, hal. 225–236, 2008, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2007.06.029.
- [18] D. Adeniji, J. Schoop, S. Gunawardena, C. Hanson, dan M. Jahan, “Characterization and Modeling of Surface Roughness and Burr Formation in Slot Milling of Polycarbonate,” *J. Manuf. Mater. Process.*, vol. 4, no. 2, hal. 1–22, 2020, doi: 10.3390/JMMP4020059.
- [19] N. Chen, X. Zhang, J. Wu, Y. Wu, L. Li, dan N. He, “Suppressing the burr of high aspect ratio structure by optimizing the cutting parameters in the micro-milling process,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 111, no. 3–4, hal. 985–997, 2020, doi: 10.1007/s00170-020-06088-x.
- [20] K. Vipindas, B. Kuriachen, dan J. Mathew, “Investigations into the effect of process parameters on surface roughness and burr formation during micro end milling of Ti-6Al-4V,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 100, no. 5–8, hal. 1207–1222, 2019, doi: 10.1007/s00170-016-9210-3.
- [21] S. P. Khanghah, M. Boozarpour, M. Lotfi, dan R. Teimouri, “Optimization of micro-milling parameters regarding burr size minimization via RSM and simulated annealing algorithm,” *Trans. Indian Inst. Met.*, vol. 68, no. 5, hal. 897–910, 2015, doi: 10.1007/s12666-015-0525-9.
- [22] V. K. Mamidi dan M. A. Xavier, “A Review on Selection of Cutting Fluids,” *J. Res. Sci. Technol.*, vol. 1, no. 5, hal. 3–19, 2012, [Daring]. Tersedia pada: https://www.researchgate.net/profile/Vamsi_Mamidi/publication/268684157_A_REVIEW_ON_SELECTION_OF_CUTTING_FLUIDS/links/547317820cf24bc8ea19b1f8/A-REVIEW-ON-SELECTION-OF-CUTTING-FLUIDS.pdf
- [23] C. Claudin, A. Mondelin, J. Rech, dan G. Fromentin, “Effects of a straight oil on friction at the toolworkmaterial interface in machining,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 50, no. 8, hal. 681–688, 2010, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2010.04.013.
- [24] J. Sharma dan B. S. Sidhu, “Investigation of effects of dry and near dry machining on AISI D2 steel using vegetable oil,” *J. Clean. Prod.*, vol. 66, hal. 619–623, 2014, doi: 10.1016/j.jclepro.2013.11.042.